

Вплив застосування накопичувача енергії на рівень викидів забруднюючих речовин маневровим локомотивом

Р. О. Яровий, Н. Б. Чернецька-Білецька, Є. В. Михайлов

Основна кількість викидів забруднюючих речовин до атмосфери на залізничних станціях здійснюються маневровими локомотивами. Питома кількість цих викидів залежить від позиції контролера машиніста, на якій працює тепловоз, так як кожній позиції контролера відповідає певна частота обертання та потужність дизеля. Досліджено вплив застосування накопичувача енергії у силовому ланцюзі маневрового локомотиву на рівень викидів забруднюючих речовин в атмосферу при виконанні ним різних видів маневрових робіт. Встановлений зв'язок між рівнями викидів забруднюючих речовин в атмосферу та видами маневрових робіт, що виконуються. Отримані статистичні дані щодо часу роботи маневрового тепловозу на кожній позиції контролера машиніста при виконанні різних видів маневрових робіт. Це дозволяє оптимально підібрати параметри накопичувача енергії для маневрового локомотива, який задовольняє як технічним, так і екологічним вимогам. В результаті проведених досліджень встановлено, що при використанні накопичувача енергії у силовому ланцюзі маневрового тепловоза кількість викидів в атмосферу оксиду вуглецю CO , оксиду азоту NO_x , діоксиду сірки SO_2 , сажі та вуглеводнів зменшується на 20...30 % в залежності від виду виконуваних маневрових робіт та ємності застосованого накопичувача енергії. Зменшення вказаних викидів дасть змогу поліпшити екологічний стан в межах станції.

Ключові слова: викиди забруднюючих речовин, манєврова робота, модернізація маневрових локомотивів, накопичувач енергії, гібридний привід

1. Вступ

Основна кількість викидів забруднюючих речовин до атмосфери на залізничних станціях здійснюються маневровими локомотивами. До складу вихлопних газів тепловозних дизелів входять наступні основні компоненти: пари води, кисень, двоокис вуглецю, окис і двоокис азоту, водень, вуглеводні, сірчистий ангідрид, альдегіди і сажа. Викиди тепловозних дизелів при маневровій роботі здійснюють негативний вплив на навколишнє середовище. Тому, використання ресурсозбержуючих та нешкідливих для навколишнього середовища технологій є одним із основних завдань при модернізації та побудові нових маневрових локомотивів для залізничного транспорту. Актуальними слід вважати дослідження, спрямовані на подальше удосконалення і розвиток використання таких ресурсозбержуючих та нешкідливих для навколишнього середовища технологій, як технологія накопичення та подальшого використання енергії рекуперації та надлишкової енергії на рухомому складі.

2. Аналіз літературних даних і постановка проблеми

Проблематиці зменшення викидів забруднюючих речовин в атмосферу транспортними засобами присвячена достатньо велика кількість наукових робіт. Так, у роботі [1] визначалися кількісні та якісні показники викидів забруднюючих речовин в атмосферу при роботі мобільних джерел викидів, та вплив цих викидів на людину. За характером впливу на людину їх можна розділити на дві групи: нетоксичні та токсичні. До нетоксичних речовин належать: азот, кисень, парі води, двоокис вуглеводню і водень. До токсичних речовин належать вуглеводневі канцерогени, які накопичуються до критичних концентрацій та стимулюють розвиток злоякісних пухлин. Крім того, до токсичних речовин належать групи вуглеводнів (особливо олефіни), які утворюють зміг. Також смороду вступають в реакцію з оксидами азоту під впливом сонячного опромінення і утворюють озон і інші біологічно активні речовини, які викликають захворювання очей і носогорлової порожнини людини, а також шкідливо впливають на рослинний і тваринний світ. Однак слід зазначити, що в даній роботі не розглядалися конкретні джерела такого забруднення, тобто маневрові локомотиви. У роботі [2] досліджувалися зменшення викидів шкідливих речовин, пов'язаних з використанням електромобілів та гібридних машин. Було проаналізовано характеристики гібридного та електричного автотранспорту та їх вплив на зменшення шкідливих викидів. Авторами роботи [3] розглядалися екологічні аспекти зменшення шкідливих викидів та їх впливу на навколишнє середовище. Визначенню впливу оксиду азоту на навколишнє середовище та його з'єднань присвячена робота [4]. По небезпечному впливу на людину та природу оксиди азоту є найбільш шкідливими викидами дизеля. Азот, з'єднуючись з киснем, може утворювати 5 з'єднань: NO , NO_2 , NO_3 , NO_4 , NO_5 . Безпосередньо на людину NO_x впливає з інкубаційним періодом. Небезпека полягає в тому, що коли людина працює на повітрі з великим вмістом NO_x , вона спочатку майже нічого не відчуває, але потім може важко захворіти. Основний негативний вплив NO_x відбувається шляхом утворення в дихальних шляхах азотної і азотистої кислоти за рахунок реакції з водою. Ступінь впливу NO_x на людину майже в 10 разів сильніше окису вуглецю.

Аналіз передумов модернізації маневрових тепловозів з гібридною енергетичною установкою представлено у [5]. Авторами встановлено зменшення шкідливих викидів при використанні тепловозів з гібридною силовою установкою, але не визначалися кількісні показники цього зменшення та взаємозв'язки факторів, що впливають. Дослідження впливу основних факторів експлуатації дизелів тепловозів на викиди забруднюючих речовин викладені у роботі [6]. Авторами проаналізовані методи для зменшення кількості викидів маневровими локомотивами. Роботи [7, 8] призначені аналізу обсягів викидів оксиду вуглецю та твердих частин при роботі дизельних двигунів в залежності від умів їх роботи. Вміст окису вуглецю у вихлопних газах дизелів є відносно невеликим в порівнянні з карбюраторними двигунами, так як основні продукти неповного згоряння у вихлопних газах виділяються у вигляді сажі. Поступаючи в організм людини, окис вуглецю з'єднується з гемоглобіном крові та дає стійке з'єднання – карбоксигемоглобін, який погіршує процес газообміну і призводить до кисневого голодування. Сажа, яка у вигляді диму виділяється з вихлопними газами, характеризує

повноту згоряння палива. Частки сажі забруднюють навколишнє середовище та перешкоджають потокам фотонів і світлової енергії. Утворений при цьому карбон не згорає через високу енергію активації і викидається разом з іншими продуктами згоряння у вихлопних газах. Дослідження зміни кількості викидів оксиди азоту в залежності від експлуатаційних характеристик дизеля та параметрів навколишнього середовища проведене у роботі [9]. Автори роботи [10] визначають вплив систем очищення вихлопних газів на обсяги шкідливих викидів до навколишнього середовища. Але при цьому аналізі розглядалися тільки системи очищення для автомобільних двигунів. У статті [11] розглянуто питання розрахунку викидів шкідливих речовин з відпрацьованими газами дизелів тепловозів. Розглянуто різні підходи до розрахунків та методики їх виконання.

Аналіз відомих літературних джерел показав, що вказана тематика досліджена достатньо широко, але у роботах майже не розглядалася зміна кількості забруднюючих викидів в залежності від позиції контролера машиніста та виду виконуваної маневрової роботи. При дослідженнях експлуатаційних характеристик гібридного маневрового тепловозу з накопичувачем енергії не була досліджена залежність між параметрами застосованого накопичувача енергії та зменшенням кількості шкідливих викидів дизеля.

3. Мета та задачі дослідження

Метою роботи є визначення впливу застосування накопичувача енергії у силовому ланцюзі маневрового тепловоза на зменшення обсягів викидів забруднюючих речовин в атмосферу при виконанні різних видів маневрових робіт.

Для досягнення мети були поставлені такі завдання:

- визначити середньостатистичний час роботи маневрового тепловозу на кожній позиції контролера машиніста при виконанні різних видів маневрових робіт;
- визначити кількість викидів забруднюючих речовин в атмосферу при роботі маневрового тепловоза на кожній позиції контролера машиніста при виконанні різних видів маневрових робіт;
- визначити вплив застосування накопичувача енергії у силовому ланцюзі маневрового тепловоза на рівень викидів забруднюючих речовин в атмосферу шляхом порівняння відповідних результатів для локомотиву з накопичувачем енергії та локомотиву зі штатним виконанням силового ланцюга.

4. Експериментально-розрахункове визначення кількості викидів забруднюючих речовин в атмосферу при роботі маневрового тепловоза на окремій позиції контролера машиніста

Дослідження проводилися на маневровому тепловозі ЧМЕЗТ-7310 з дизелем потужністю 993 кВт, напрацюванням 630 мотогодин та комбінованим накопичувачем енергії виробництва фірми «Еконд» з потужністю 150 кВт у силовому ланцюзі. Дослідження проводилися при виконанні локомотивом різних видів маневрових робіт на території станції Лиман Донецької залізниці. Станція Лиман є вузловою позакласною сортувальною станцією, на якій виконуються усі види маневрових робіт. Періодичні екологічні випробування тепловозів проводяться в установлені інтервали часу протягом терміну експлуатації кожного тепловоза з метою визначення

питомих викидів забруднюючих речовин, які містяться у відпрацьованих газах дизелів тепловозів. Реостатні випробування маневрового тепловозу ЧМЕЗТ-7310 були проведені в червні 2019 р. в Слов'янському локомотивному депо (Україна). При цьому визначалися питома ефективна витрата палива дизель-генератором, час проходження перехідних процесів та екологічні показники роботи дизеля на всіх режимах. Засоби вимірювання та методики досліджень використовувалися відповідно до вимог галузевого стандарту ГСТУ 32.001-94 [12]. Результати визначення екологічних показників тепловоза ЧМЕЗТ-7310 приведені у табл. 1.

За результат вимірювань приймалося середньоарифметичне значення, отримане при проведенні не менше ніж трьох експериментів.

$$C_{cp} = \frac{C_1 + C_2 + C_3}{3}, \quad (1)$$

де C_1, C_2, C_3 – результат 1, 2 та 3 -ого вимірювання.

Питомі викиди оксидів азоту C_{NO_x} , оксиду вуглецю C_{CO} , вуглеводнів C_{CH} у г/(кВт·год.) на кожній позиції контролера машиніста розраховувались за формулами (2), (3), (4) згідно вимог галузевого стандарту ГСТУ 32.001-94 [12]:

$$C_{NO_x j} = \frac{5,72 \cdot 10^4 C_{NO_x} (G_{air} - 0,000974 G_f)}{P_{ej}}, \quad (2)$$

$$C_{CO j} = \frac{3,475 \cdot 10^4 C_{CO} (G_{air} - 0,000974 G_f)}{P_{ej}}, \quad (3)$$

$$C_{CH j} = \frac{5,46 \cdot 10^4 C_{CH} (G_{air} - 0,000974 G_f)}{P_{ej}}, \quad (4)$$

де j – номер позиції контролера машиніста (0–8, 0 – холостий хід); G_{air} – витрата повітря, кг/с; G_f – витрата палива, кг/с; P_{ej} – ефективна потужність дизеля на режимі випробування; C_{CO} – концентрація оксидів вуглецю, ‰; C_{NO_x} – концентрація оксидів азоту, ‰; C_{CH} – концентрація вуглеводнів, ‰.

Витрата повітря через дизель тепловозу у кг/с визначається за такою залежністю:

$$G_{air} = \frac{\alpha_{\Sigma} L_{air}^0 G_f}{1000}, \quad (6)$$

де L_{air}^0 – кількість повітря, теоретично необхідна для згорання 1 кг палива, $L_{air}^0 = 14,32$ кг пов./кг палива; α_{Σ} – сумарний коефіцієнт надлишку повітря, що визначається за результатами аналізу ВГ та реакції горіння малосірчастих палив.

Таблиця 1

Результати визначення екологічних показників маневрового тепловоза ЧМЕЗТ-7310

| № ре- жиму | Витрата палива, кг/год. | Потужність допоміжного устаткування, кВт | Потуж- ність, кВт | α | CO ₂ , ‰ | CNO, ‰ | CNO ₂ , ‰ | CCO, ‰ | CNO _x , ‰ | CCH , ‰ |
|------------------|-------------------------------|--|-------------------------|----------|------------------------|-----------|-------------------------|-----------|-------------------------|------------|
| хх | 2,84 | 2,28 | 0 | 12,24 | 23,1 | 310 | 59 | 269 | 369 | 16 |
| | | | | 13,4 | 21,6 | 287 | 53 | 295 | 340 | 15 |
| | | | | 12,66 | 22,2 | 315 | 50 | 271 | 365 | 14 |
| 1 | 37,015 | 19,45 | 180 | 1,49 | 7,4 | 842 | 166 | 244 | 431 | 18 |
| | | | 177 | 1,31 | 7,1 | 805 | 181 | 261 | 513 | 22 |
| | | | 182 | 1,51 | 8,0 | 880 | 171 | 227 | 477 | 17 |
| 2 | 48,904 | 23,76 | 207 | 1,79 | 9,4 | 842 | 189 | 194 | 1431 | 28 |
| | | | 215 | 1,84 | 9,7 | 895 | 208 | 179 | 1513 | 29 |
| | | | 210 | 1,81 | 9,5 | 900 | 197 | 187 | 1477 | 27 |
| 3 | 67,205 | 31,65 | 414 | 1,81 | 9,5 | 913 | 209 | 307 | 1022 | 31 |
| | | | 415 | 1,82 | 9,6 | 940 | 208 | 335 | 1048 | 31 |
| | | | 417 | 1,9 | 9,7 | 950 | 210 | 337 | 1052 | 32 |
| 4 | 91,600 | 38,12 | 525 | 2,0 | 10,5 | 965 | 202 | 338 | 1060 | 32 |
| | | | 525 | 1,95 | 10,0 | 980 | 210 | 320 | 1055 | 33 |
| | | | 526 | 2,07 | 10,9 | 985 | 222 | 341 | 1067 | 31 |
| 5 | 119,025 | 47,85 | 620 | 2,16 | 11,4 | 844 | 219 | 365 | 1053 | 32 |
| | | | 623 | 2,18 | 11,5 | 937 | 213 | 362 | 1140 | 32 |
| | | | 620 | 2,20 | 11,7 | 990 | 230 | 360 | 1051 | 33 |
| 6 | 136,045 | 61,64 | 723 | 2,18 | 11,5 | 988 | 237 | 370 | 1055 | 35 |
| | | | 722 | 2,32 | 11,9 | 995 | 239 | 365 | 1060 | 36 |
| | | | 750 | 2,36 | 11,4 | 938 | 214 | 365 | 1052 | 38 |
| 7 | 177,011 | 95,81 | 830 | 2,18 | 11,5 | 844 | 211 | 344 | 1055 | 37 |
| | | | 835 | 2,38 | 11,5 | 922 | 246 | 380 | 1085 | 38 |
| | | | 830 | 2,42 | 11,9 | 957 | 242 | 377 | 1078 | 38 |
| 8 | 205,850 | 137,70 | 935 | 2,55 | 11,8 | 948 | 240 | 381 | 1088 | 38 |
| | | | 930 | 2,51 | 11,7 | 955 | 244 | 380 | 1090 | 39 |
| | | | 950 | 2,54 | 11,9 | 947 | 251 | 341 | 1091 | 38 |

Сумарний коефіцієнт надлишку повітря α_{Σ} для середнього складу дизельного палива у навколишньому повітрі обчислюється за формулою

$$\alpha_{\Sigma} = 1 + \frac{21 - 1,353C_{\text{CO}_2} - 0,958C_{\text{CO}} - 0,5C_{\text{NO}_x} - 0,63C_{\text{NO}}}{C_{\text{CO}_2} + 0,5C_{\text{CO}} + 0,4468(C_{\text{CO}_2} + C_{\text{CO}}) + 0,5C_{\text{NO}_x}}, \quad (7)$$

де C_{CO_2} – концентрація диоксида вуглецю у ВГ, ‰; C_{NO} – концентрація оксиду азоту, ‰.

Ефективна потужність у кВт на режимі випробувань P_e визначається за такою формулою:

$$P_e = P_{ег} + P_{д.м.}, \quad (8)$$

де $P_{ег}$ – потужність, виміряна на клеммах генератора, кВт; $P_{д.м.}$ – потужність додаткового обладнання та механізмів тепловозу (з урахуванням циклічності їх роботи), що мають механічний привід від дизеля (вентилятори охолоджувальних камер, вентилятори тягових двигунів, компресор і т. д.).

Таблиця 2

Рівень середньоексплуатаційних питомих викидів, г/(кВт.год.)

| Найменування забруднюючої речовини | Позиції контролера машиніста | | | | | | | | |
|------------------------------------|------------------------------|------|------|------|------|-------|-------|-------|------|
| | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| CO | 0,6 | 0,61 | 0,66 | 0,75 | 1,42 | 2,06 | 4,3 | 5,41 | 6,37 |
| NO _x | 3,9 | 5,88 | 7,02 | 9,80 | 10,1 | 10,60 | 10,76 | 11,40 | 11,7 |
| SO ₂ | 0,03 | 0,26 | 0,41 | 0,72 | 1,09 | 1,43 | 2,15 | 2,68 | 2,86 |
| Сажа | 0,04 | 0,06 | 0,07 | 0,09 | 0,18 | 0,31 | 0,32 | 0,34 | 0,36 |
| Вуглеводні | 0,13 | 1,99 | 2,11 | 3,22 | 5,41 | 6,45 | 9,7 | 11,01 | 12,9 |

Ефективна потужність у кВт з урахування накопичувача енергії P_e визначається за такою формулою:

$$P_e = P_{ег} + P_{д.м.} - P_{не}, \quad (9)$$

де $P_{не}$ – потужність, накопичена у результати електродинамічного гальмування (11), кВт;

Середньо-експлуатаційні питомі викиди забруднюючих речовин у г/(кВт.год.) у залежності від позиції контролера машиніста та часу роботи дизеля тепловозу на цій позиції обчислюються за формулою [12]:

$$M_{зр} = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=0}^8 (C_{ij} t_j P_j)}{\sum_{j=0}^8 (t_j P_j)} k_v k_f k_t, \quad (10)$$

де C_{ij} – питомий викид ЗР (NO_x, CO, CH) при роботі на j -й позиції контролера машиніста, г/(кВт.год.) (табл. 2);

t_i – частка часу роботи тепловоза на j -й позиції контролера машиніста;

k_f – коефіцієнт впливу технічного стану тепловозів. Приймається рівним 1,2 для тепловозів з терміном експлуатації більше 2-х років і рівним 1,0 для тепловозів з терміном експлуатації менше 2-х років;

k_t – коефіцієнт впливу кліматичних умов роботи тепловозів. Приймається рівним 1,2 для районів, розташованих на південь від 44 північної широти і рівним 0,8 для районів на північ від 60 північної широти. Для інших районів $k_t=1,0$;

k_v – коефіцієнт впливу швидкості руху тепловоза, для маневрових робіт швидкості руху невеликі тому приймаємо $k_v=1,2$.

5. Взаємозв'язок між часом роботи маневрового тепловозу на кожній позиції контролера машиніста та видами маневрових робіт

Відомо, що маневрова робота характеризується великими простоями тепловоза в очікуванні, частою зміною позицій контролера машиніста, роботою на низьких позиціях контролера, великою кількістю прискорень та гальмувань. В цілому ці процеси носять стохастичний характер. При виконанні маневрових переміщень тепловози працюють на перехідних режимах. При аналізі маневрової роботи можливо виділити декілька характерних видів робіт, які мають схожі характеристики: роботу на гірці, вивозну роботу, маневрову роботу на станції та на ділянці.

На більшості маневрових локомотивів зараз встановлена система контролю витрат палива «БІС-Р» (ЧП «РЕЗЕРВ», Україна), яка являє собою розподілену мікропроцесорну систему для контролю витрат палива маневровими тепловозами. Вона фіксує витрати палива, потужність, час роботи на кожній позиції контролера машиніста протягом 10 діб з дискретністю 2 хв.

Аналіз даних системи «БІС-Р» дозволив визначити середній час роботи маневрового тепловозу на i -й позиції контролера в залежності від виду виконуваних маневрових робіт. Результати цього аналізу приведені на рис. 1.

На рис. 1 добре помітний нерівномірний розподіл часу роботи маневрового тепловозу на окремих позиціях контролера машиніста в залежності від виду виконуваної маневрової роботи. Такий характер розподілу впливає на відповідну кількість забруднюючих речовини що викидаються до атмосфери (табл. 1).

Результати розрахунків за формулою (10) середньо-експлуатаційних питомих викидів забруднюючих речовин, що викидаються до атмосфери маневровим локомотивом, в залежності від виду маневрової роботи показані на рис. 2.

Аналіз отриманих даних свідчить що, чим більше часу маневровий локомотив працює на високих позиціях контролера, тим більша кількість забруднюючих речовин викидається до атмосфери. У першу чергу це відноситься до роботи на гірці та вивозної роботи.

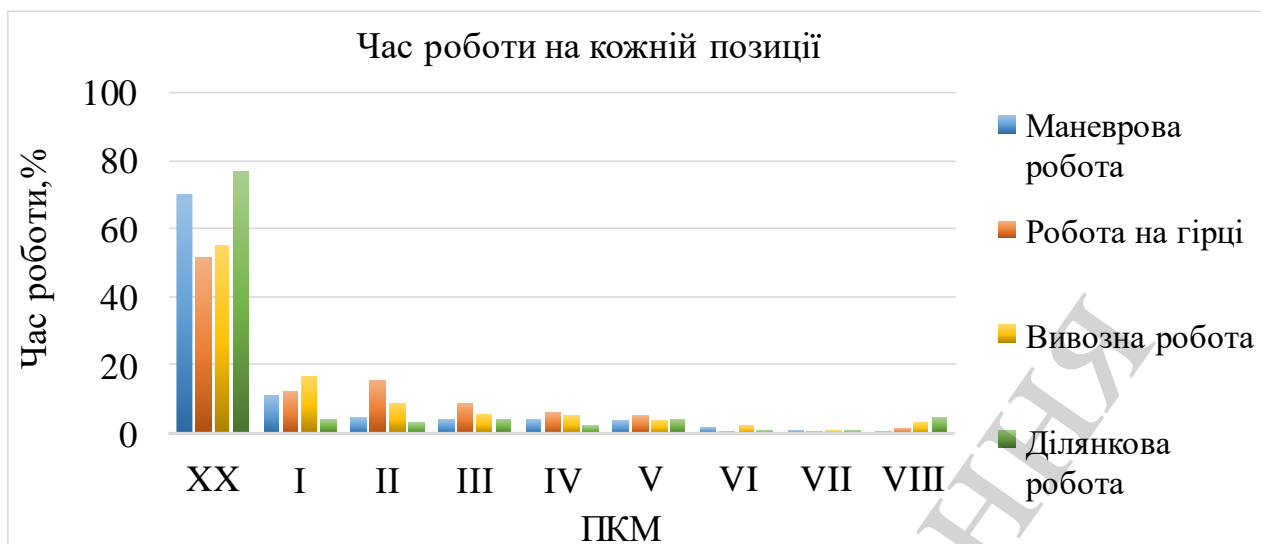


Рис. 1. Частка часу роботи маневрового тепловозу в залежності від типу маневрових робіт



Рис. 2. Сумарне значіння питомих викидів забруднюючих речовини, в залежності від типу маневрової роботи

6. Визначення кількості шкідливих викидів маневровим тепловозом при застосуванні накопичувача енергії у силовому ланцюзі

При застосуванні накопичувача енергії у силовому ланцюзі маневрового тепловозу з'являється можливість накопичення енергії електродинамічного гальмування та заряду накопичувача на холостому ході для подальшого використання її на тягу (9).

Енергію електродинамічного гальмування можливо визначити за формулою [13]:

$$P_{ne} = \frac{v_i^2 - \frac{1}{\eta_e} \left(\frac{\sum R_y C U^2}{C \Phi^2} \right)}{7.2b}, \quad (11)$$

де η_e – ККД накопичувача;

b – коефіцієнт враховуючий масу та інерцію рухомого складу,

СФ – навантажувальна характеристика;

n – кількість тягових двигунів;

I_T – гальмівний струм, А.

$$b = \frac{3.6n}{(1 + \gamma)Q\eta_v} 10^{-3}, \quad (12)$$

де η_v – ККД механічної передачі;

Швидкість руху маневрового складу в будь-якій точці визначається за формулою:

$$v_i = v_{i-1} + a\Delta t, \quad (13)$$

де a – прискорення (уповільнення) поїзда при дії прискорюючої (сповільнюючої) сили в м/с²; Δt – крок інтегрування, в розрахунках приймається рівним с; v_{i-1} – швидкість руху при попередньому кроці, м/с;

Величину прискорення (уповільнення) поїзда розраховуємо на основі диференціального рівняння руху поїзда [17]:

$$a = \frac{(F - w_q'' - w_l')}{Q} - (S - L_2) \frac{(Qg)}{(1 + \gamma)} + \frac{L_b}{g} + m_l, \quad (14)$$

де F – питома сила тяги локомотива, Н; w_q'' – загальний питомий опір руху рухомого складу, Н/кг; w_l' – загальний питомий опір руху локомотиву, Н/кг; L_2 – довжина підгірного шляху, м; L_2 – довжина насувної частини, м; S – загальна довжина, м; γ – коефіцієнт що враховує інерцію рухомого складу; Q – маса рухомого складу, кг.

Струм гальмування, пов'язаний зі швидкістю руху поїзда:

$$I_T = \frac{v_i \cdot \text{СФ}}{\sum R_{\text{ц}}}, \quad (15)$$

де $\sum R_{\text{ц}}$ – загальний опір кола двигун та накопичувач, Ом;

Зміну кількості середньоексплуатаційних питомих шкідливих викидів при застосуванні накопичувача енергії обчислюємо за формулою

$$\Delta = M_{\text{зр1}} - M_{\text{зр2}}, \quad (16)$$

де $M_{зр1}$ – середньоексплуатаційні питомі викиди забруднюючих речовин без накопичувача енергії (10), г/(кВт·год.); $M_{зр2}$ – середньоексплуатаційні питомі викиди забруднюючих речовин з накопичувачем енергії, г/(кВт·год.).

На рис. 3. приведена діаграма залежності зменшення кількості середньоексплуатаційних питомих викидів забруднюючих речовини маневровим локомотивом з накопичувачем енергії, від виду виконуваної маневрової роботи, розрахованих за формулою (16).

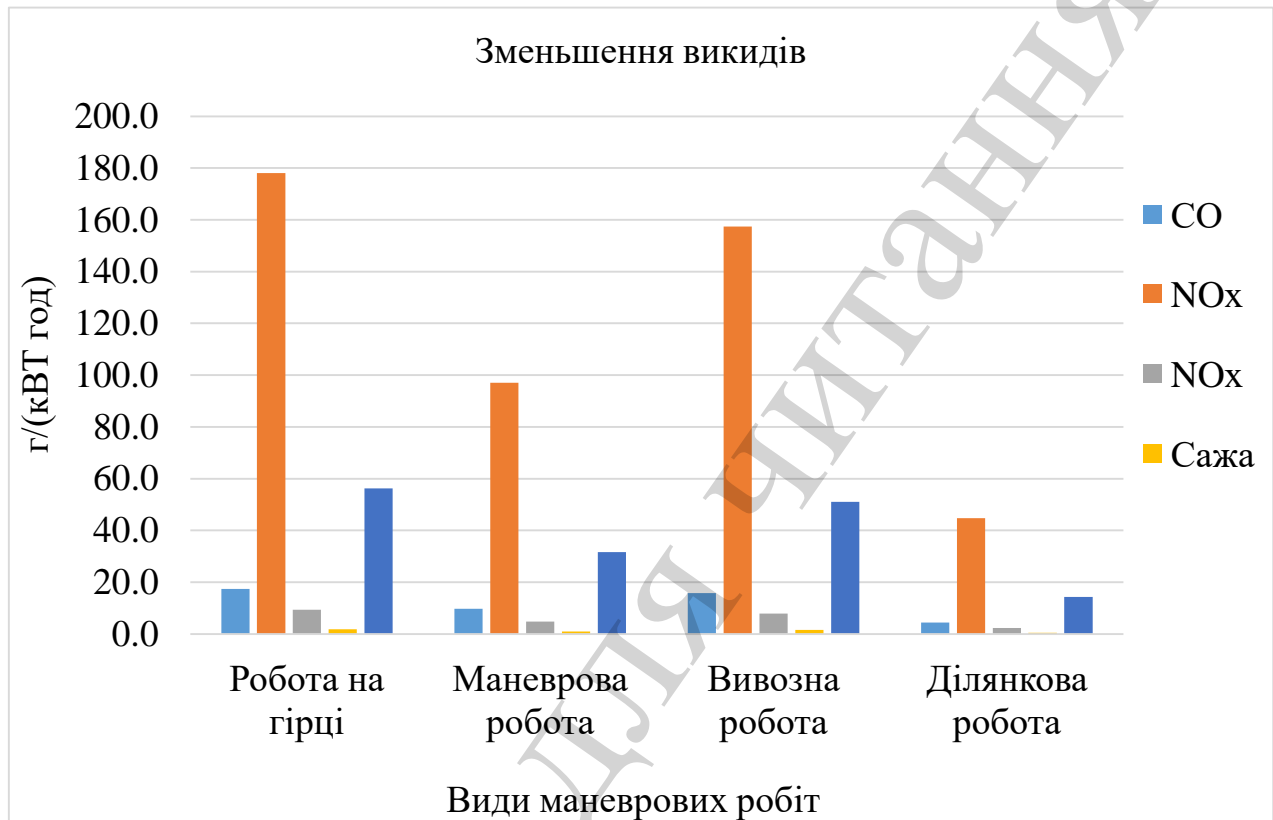


Рис. 3. Залежності зменшення кількості середньоексплуатаційних питомих викидів забруднюючих речовини маневровим локомотивом з накопичувачем енергії від виду виконуваної маневрової роботи

Відповідний відсоток зменшення середньо-експлуатаційних питомих викидів з накопичувачем енергії розраховано за формулою:

$$\Delta\% = \left(\frac{M_{зр2} - M_{зр1}}{M_{зр1}} \right) \cdot 100\% \quad (17)$$

Отримані значення відсотків зменшення середньоексплуатаційних питомих викидів тепловозом із накопичувачем енергії наведено в табл. 3.

Таблиця 3

Відсоток зменшення середньоексплуатаційних питомих викидів, %

| Найменування забруднюючої речовини | Робота на гірці | Вивіз на роботу | Маневрова робота | Ділянкова робота |
|------------------------------------|-----------------|-----------------|------------------|------------------|
| CO | 21 % | 12 % | 16 % | 4 % |
| NO _x | 30 % | 19 % | 27 % | 9 % |
| SO ₂ | 26 % | 19 % | 20 % | 7 % |
| Сажа | 23 % | 14 % | 19 % | 6 % |
| Вуглеводи | 32 % | 25 % | 26 % | 10 % |

Як видно з аналізу даних табл. 3, відсоток зменшення середньоексплуатаційних питомих викидів забруднюючих речовини до атмосфери маневровим локомотивом з накопичувачем енергії у силовому ланцюгу на різних видах маневрових робіт неоднаковий. Це пов'язане з різною кількістю накопиченої накопичувачем енергії, яка залежить від характеру виконуваної маневрової роботи. Так, маневрова робота на гірці має максимальні показники зменшення середньоексплуатаційних питомих викидів, тому що при такій роботі має місце велика кількість циклічних прискорень та гальмувань.

7. Обговорення результатів дослідження

При використанні накопичувача енергії на маневровому тепловозі частина енергії електродинамічного гальмування при русі маневрового складу та енергії від роботи дизель-генераторної установки тепловозу на холостому ходу запасастся в накопичувачі, а потім використовується на тягу. При цьому зменшується кількість енергії, яку потрібно відбирати від дизель-генераторної установки на тягу локомотива. Завдяки цьому знижується кількість середньоексплуатаційних питомих викидів забруднюючих речовин до атмосфери від дизеля маневрового тепловоза.

Проведені дослідження дозволили встановити різницю сумарного часу роботи маневрового тепловозу на окремій позиції контролера машиніста для умов виконання різних видів маневрових робіт. Діаграма розподілу цього часу в залежності від позиції контролеру та виду виконуваної тепловозом маневрової роботи надана на рис. 1.

Для оцінки ефективності застосування накопичувача енергії у силовому ланцюзі маневрового тепловозу запропоновано новий підхід до розрахунків визначення кількості шкідливих викидів від дизеля тепловоза до атмосфери, що враховує режим роботи локомотива, а саме – позицію контролера машиніста та вид виконуваної маневрової роботи.

Такий підхід до розрахунків дозволив виявити взаємозв'язок між обсягами накопиченої накопичувачем енергії та кількістю викидів забруднюючих речовин в атмосферу маневровими локомотивами. На рис. 2 надані сумарні значення кількості питомих викидів забруднюючих речовин в залежності від виду виконуваної маневрової роботи, які розраховані в залежності від часу роботи на кожній позиції контролера машиніста.

Слід зауважити, що дослідження проводилися для умов виконання маневрових робіт, які здійснюються на залізничній станції та під'їзних коліях. В роботі не розглядалась магістральна робота дизельних локомотивів, при якій кількість накопиченої енергії залежить в першу чергу від профілю рейкової колії.

Подальший розвиток досліджень у прийнятому напрямку полягає в визначенні можливостей зменшення викидів забруднюючих речовин в атмосферу різними типами маневрових тепловозів в залежності від параметрів застосованих гібридних силових установок та накопичувачів енергії на різних режимах виконуваної маневрової роботи.

Запропонований підхід дасть змогу встановлювати раціональні характеристики накопичувача енергії маневрового локомотиву для виконання ним певного виду маневрової роботи.

8. Висновки

1. Підтверджено, що кількість викидів забруднюючих речовин в атмосферу від дизеля маневрового тепловоза залежить від позиції контролера машиніста, на якій він працює. Від номеру позиції контролера машиніста напряму залежать використовувана потужність дизель-генератора, тому при роботі на високих позиціях контролера утворюється більша кількість питомих викидів забруднюючих речовин.

2. Для оцінки ефективності застосування накопичувача енергії у силовому ланцюзі маневрового тепловозу запропоновано новий підхід до розрахунків визначення кількості шкідливих викидів від дизеля тепловоза до атмосфери, що враховує режим роботи локомотива, а саме – позицію контролера машиніста та вид виконуваної маневрової роботи.

3. У результаті обробки даних системи БІС-Р визначено середньостатистичний час роботи маневрового тепловозу на кожній позиції контролера машиніста. Встановлені відмінності сумарного часу роботи на кожній позиції контролера машиніста для кожного виду виконуваних маневрових робіт.

4. Результати проведених розрахунків свідчать, що при використанні накопичувача енергії у силовому ланцюзі маневрового тепловоза питомі обсяги викидів в атмосферу оксиду вуглецю CO зменшується на 4...21 %, оксиду азоту NO_x – на 9...30 %, діоксиду сірки SO_2 – на 7...26 %, сажі – на 6...23 %, вуглеводнів – на 10...32 % в залежності від виду виконуваної маневрової роботи.

Література

1. Walsh, M. P. (2011). Mobile Source Related Air Pollution: Effects on Health and the Environment. Encyclopedia of Environmental Health, 803–809. doi: <https://doi.org/10.1016/b978-0-444-52272-6.00184-7>
2. Buekers, J., Van Holderbeke, M., Bierkens, J., Int Panis, L. (2014). Health and environmental benefits related to electric vehicle introduction in EU countries. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 33, 26–38. doi: <https://doi.org/10.1016/j.trd.2014.09.002>
3. Dzikuć, M., Adamczyk, J. (2014). The ecological and economic aspects of a low emission limitation: a case study for Poland. The International Journal of

Life Cycle Assessment, 20 (2), 217–225. doi: <https://doi.org/10.1007/s11367-014-0819-x>

4. Düring, I., Bächlin, W., Ketzel, M., Baum, A., Friedrich, U., Wurzer, S. (2011). A new simplified NO/NO₂ conversion model under consideration of direct NO₂-emissions. *Meteorologische Zeitschrift*, 20 (1), 67–73. doi: <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2011/0491>

5. Гончаров, О. М., Кінтер, С. О., Терещак, Ю. В. (2014). Аналіз передумов модернізації маневрових тепловозів Львівської залізниці гібридною енергетичною установкою. *Залізничний транспорт України*, 6, 19–25.

6. Каграманян, А. О., Рукавішников, П. В. (2010). Дослідження впливу основних факторів експлуатації дизелів тепловозів на викиди забруднюючих речовин. *Збірник наукових праць ДОНІЗТ*, 21, 160–169.

7. Tighe, C. J., Twigg, M. V., Hayhurst, A. N., Dennis, J. S. (2012). The kinetics of oxidation of Diesel soots by NO₂. *Combustion and Flame*, 159 (1), 77–90. doi: <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2011.06.009>

8. Sarvi, A., Lyyrinen, J., Jokiniemi, J., Zevenhoven, R. (2011). Particulate emissions from large-scale medium-speed diesel engines: 1. Particle size distribution. *Fuel Processing Technology*, 92 (10), 1855–1861. doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2011.04.031>

9. Lee, T., Park, J., Kwon, S., Lee, J., Kim, J. (2013). Variability in operation-based NO_x emission factors with different test routes, and its effects on the real-driving emissions of light diesel vehicles. *Science of The Total Environment*, 461–462, 377–385. doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.05.015>

10. Reşitoğlu, İ. A., Altinişik, K., Keskin, A. (2014). The pollutant emissions from diesel-engine vehicles and exhaust aftertreatment systems. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 17 (1), 15–27. doi: <https://doi.org/10.1007/s10098-014-0793-9>

11. Фалендиш, А. П., Гатченко, В. О., Клецка, О. В. (2017). Аналіз підходів до розрахунку викидів забруднюючих речовин з відпрацьованими газами дизель поїздів. *Вісник ім. В. Даля*, 3 (233), 228–233.

12. ГСТУ 32.001-94. Викиди забруднюючих речовин з відпрацьованими газами тепловозних дизелів. Норми та методи визначення. Чинний від 01.01.1995 р.

13. Яровий, Р. О., Чернецька-Білецька, Н. Б. (2019). Методика імітаційного моделювання процесів електродинамічного гальмування. *Вісник ім. В. Даля*, 3 (251), 216–219.

14. Кудрявцев, А. П., Чичин, А. В., Сакаев, Э. К. (1999). Средства экологического контроля. *Локомотив*, 3, 26–28.

15. Смайлис, В. И. (1991). Современное состояние и новые проблемы экологии дизелестроения. *Двигателестроение*, 1, 3–6.

16. Малов, Р. П., Евгунов, П. М., Панков, Ю. Н., Шейнин, М. Г. (1991). Техничко-екологические характеристики тепловозов. М.: ТР. ВНИИЖТ, 35–40.

17. Косов, Є. Є., Азаренко, В. А., Корнєв, А. Н., Комарницький, М. М. (2008). Вплив ефективності накопичувача енергії на паливну економічність локомотива. *Локомотив*, 3, 44–45.

18. Болжеларський, Я. В., Гончаров, О. М. (2007). Досвід і проблеми нормування палива на маневрову роботу в умовах Львівської залізниці. Залізничний транспорт України, 2, 71–72.
19. Liudvinavičius, L. Lingaitis, L. P. (2010). New locomotive energy management systems. Maintenance and reliability, 1, 35–41.
20. Barrade, P. (2001). Series connexion of Supercapacitors: comparative study of solutions for the active equalization of the voltage, École de Technologie Supérieure (ETS). Montréal.
21. Boyes, J. D., Clark, N. H. (2000). Technologies for energy storage. Flywheels and super conducting magnetic energy storage. 2000 Power Engineering Society Summer Meeting (Cat. No.00CH37134). doi: <https://doi.org/10.1109/pess.2000.868760>
22. Poór, I., Varga, M., Németh, G., Rónai, A., Nemes, P. (2012). Az Mk48 403 Mozdony Hibridhajtású Fejlesztése, Vasútgépészet, 4, 9–14.
23. Schofield, N., Yap, H. T., Bingham, C. M. (2005). Hybrid Energy Sources for Electric and Fuel Cell Vehicle Propulsion. 2005 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference. doi: <https://doi.org/10.1109/vppc.2005.1554530>
24. Steiner, M., Scholten, J. (2005). Energy storage on board of railway vehicles. 2005 European Conference on Power Electronics and Applications. doi: <https://doi.org/10.1109/epe.2005.219410>